

基于 Sigmoid 函数的限制水域船舶避障路径建模

王仁强, 赵 越

(江苏海事职业技术学院 航海学院 江苏 南京 211170)

摘 要: 为了解决限制水域船舶避障问题,设计了一种基于 Sigmoid 函数的船舶避障路径规划方法. 首先分析了船舶避障运动过程和 Sigmoid 函数几何特征,通过借鉴路径规划理念,构建基于 Sigmoid 函数的船舶避障运动轨迹. 然后,设计一个船舶运动自抗扰控制系统实现了船舶避障运动轨迹的实时跟踪. 仿真表明基于 Sigmoid 函数构建的限制水域船舶避障路径实际有效,能够保证船舶避让障碍物.

关键词: 船舶; 避障; 路径规划; Sigmoid 函数; 受限水域; 建模

中图分类号: U666.153

文献标志码: A

文章编号: 1009-8526(2019)01-0025-04

长江是一种典型的狭水道,是我国船舶交通运输最为繁忙的水道之一. 由于该水道内航行船只来往频繁、航道宽度狭窄,以及长江上游泄洪带来的泥沙淤积等情况使得船舶在长江狭水道航行时的操纵、避碰愈发困难,从而导致船舶碰撞、搁浅等事故时有发生. 为有效解决这一问题,国内外学者从不同角度、利用各种方法开展理论应用研究. 文献[1]利用人工势场方法将船舶操纵特性引入航行规划引力模型,再以避开障碍物建立斥力模型,进而虚拟构造引力-斥力场实现船舶自动避障,其中文献[2-3]在文献[1]的基础上,利用群体智能方法对人工势场进行改进以克服势场中局部最小值问题,从而实现船舶自动避障. 文献[4]基于碰撞危险度设计障碍物避碰膨胀区,再运用模糊规则对船舶避障策略进行规划,实现了多船情况下的智能避碰目的. 文献[5]提出了基于椭圆碰撞锥预测的方法推演预测点与椭圆之间的碰撞,进一步提高无人艇对动态船只的避障效率. 文献[6]设计了一种基于局部环境信息感知的避障算法,采用模糊理论对该算法进行改进从而减小 USV 自身惯性带来的危险规避动作误差,提高了其安全性. 然而,上述研究成果均侧重于人工智能技术方面,而忽略了船舶航行避障实际情况,且现阶段的人工智能技术过于复杂,编程难于实现,不利于船舶避碰、避险实现,更不易于驾驶员的理解与应用. 文献[7-8]结合实际避碰

经验和航行外界条件限制获得本船周围的全部可航区域,通过构造预设避障路径^[9-10]完成避障任务.

基于此,本文从驾驶员通常避险做法出发,借鉴船舶避障路径规划理念,构建广义 Sigmoid 函数曲线对避险路径再规划,实现安全避险目的.

1 限制水域船舶避障基本知识

1.1 船舶避障过程

限制性水域,特别是狭水道,普遍存在航行危险物,如浅水域、障碍物等. 船舶在类似水域航行时必须进行避障操作,船舶通常采取改变航向以远离上述危险物或危险区,尽管该操作会导致船舶偏离计划航线. 当驶过让清后,船舶驾驶员会再一次改变航向以使船舶回归到原始航线上. 在详细分析上述的船舶避障操作过程,不难发现,船舶的运动轨迹近似于一条几何 Sigmoid 函数曲线,如图 1 所示.

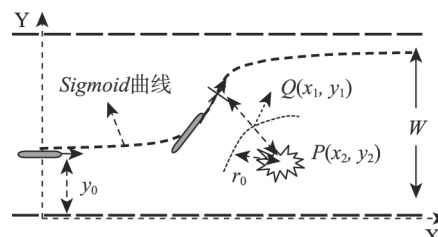


图 1 船舶避险路径

收稿日期: 2018-12-23

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(18KJB580003); 江苏高校品牌专业建设工程资助项目(PPY2015B177)

第一作者简介: 王仁强(1986—),男,硕士,讲师,研究方向: 船舶避碰理论与技术,船舶运动建模与控制

Sigmoid 函数是一个在生物学中常见的 S 型的函数. 在信息科学中, 由于其单增以及反函数单增等性质, Sigmoid 函数常被用作神经网络的阈值函数, 能将变量映射到 0 到 1 之间. 通过仔细观察其曲线图, 能够发现该曲线图所描绘的轨迹与船舶避障过程中船舶实际的航行轨迹极为相似. 为此, 本文构建恰当的 Sigmoid 函数, 并将其用于船舶避障时船舶运动轨迹可以有效地完成上述操作.

1.2 安全通过距离

船舶沿着 Sigmoid 函数曲线行驶时, 在任一时刻下, 均能与危险物保持安全的距离 D_1 . 考虑到船舶航行于限制性水域, 航道宽度和水深也是有限的, 船舶在行驶时势必要保证与航道边界保持另一安全距离 D_2 . 为了进一步简化后续建模及计算复杂度, 又不失安全性, 这里将这两个安全距离值取最大值处理 $D = \max\{D_1, D_2\}$. 在实际航行中, 上述安全距离值的大小一般是根据船舶驾驶员的航行经验进行确定.

2 限制水域船舶避险轨迹建模

本文利用 Sigmoid 函数曲线对船舶避险运动过程进行轨迹规划^[11-12]. 同时, 考虑到航道实际航行水域条件限制, 结合船舶航行方向, 以危险物或碍航物所在一侧航道为纵坐标 (X 轴), 垂直航道方向为横坐标 (Y 轴), 以船舶初始船位为坐标原点, 建立如图 1 的基于 Sigmoid 函数的限制水域船舶避险路径平面显示图.

2.1 建模相关设定

假设 1 航道为直航段, 并非弯曲航段;

假设 2 船舶可航水域宽度为图中宽度 W , 即不考虑岸壁效应对船舶航行路径的影响;

假设 3 危险物或碍航物 P 实际尺度有限, 近似认为半径为 r_0 的圆弧区域;

假设 4 暂不考虑风和水流对船舶偏航大小的影响, 即忽略风和水流对船舶航行路径的影响;

假设 5 初始条件下, 船舶保持直线航行不能安全避开危险物或碍航物;

假设 6 避障过程中, 暂不考虑与他船构成的碰撞危险.

2.2 基于 Sigmoid 函数的船舶避险轨迹规划

考虑到限制水域船舶避险过程实际条件约束, 设

计避险路径 Sigmoid 曲线, 其曲线通用数学表达式为

$$y = \frac{b}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (1)$$

式中, 变量 x 表示在全局坐标系下船舶避险过程中纵向位移, 变量 y 表示船舶避险过程中横向位移, a 、 b 和 c 是 Sigmoid 曲线的 3 个待定参数, 可以通过避险过程中实际限定条件求解获得.

基于上述假设约定, 船舶在实际避险过程中的航行路径 $y = f(x)$ 受到下列条件的限定.

限制条件 1: 最小通过距离限制, 即危险物或碍航物实际危险区最外侧 Q 点到避险路径 Sigmoid 曲线的最小距离 d 应大于等于安全通过距离, 即

$$d \geq D \quad (2)$$

式中 D 为安全通过距离.

根据 Q 点为坐标 (x_1, y_1) 和 Sigmoid 曲线函数, 可以求得最小距离为

$$d = \frac{\left| \frac{ab}{4}x_1 - y_1 - \frac{abc}{4} + \frac{b}{2} \right|}{\sqrt{\left(\frac{ab}{4} \right)^2 + 1}} \quad (3)$$

限制条件 2: 初始船舶位置偏差 y_0 限制.

$$D \leq y_0 \leq D + r_0 + y_2 \quad (4)$$

根据 Sigmoid 曲线表达式, 可得

$$y_0 = \frac{b}{1 + e^{a-c}} \quad (5)$$

限制条件 3: Sigmoid 曲线横向坐标 y 值最大限制, 即 $y_{\max} \leq W$.

根据 Sigmoid 函数可知 $y_{\max} = b$, 所以有

$$b \leq W \quad (6)$$

限制条件 4: 船舶避碰行动最晚施舵点限制. 最晚施舵点的时机为本船操满舵, 该物标与本船船舶领域^[13]边界相切位置点, 该位置点距离即为 Sigmoid 函数曲线零点到曲线拐点间的距离, 即参数 c 值大小. 所以有

$$c \geq \text{Ship Domain} \quad (7)$$

式中, Ship Domain 为船舶领域大小.

3 船舶避险轨迹跟踪控制

实际情况下, 船舶避障运动过程是通过操作舵轮改变航向, 进而按照预设避障轨迹进行操纵. 为了简化仿真操作过程, 本文设计一个船舶运动轨迹跟踪控制算法实现船舶自动跟踪避障轨迹. 其控制思想是根据船舶运动数学模型, 利用自抗扰控制理

论设计一个船舶轨迹跟踪算法.

3.1 船舶操纵运动方程式

考虑外界干扰和系统参数摄动情况下的非线性船舶航向控制系统数学模型^[14]为:

$$\dot{\Phi} + \frac{1}{T}H(\dot{\Phi}) = \frac{K}{T}\delta \quad (8)$$

式中 K 和 T 分别为船舶旋回性指数和追随性指数, Φ 为航向 δ 为舵角. $H(\dot{\Phi})$ 是 $\dot{\Phi}$ 的非线性函数, 可以近似表示为

$$H(\dot{\Phi}) = \alpha_1 \dot{\Phi} + \alpha_2 \dot{\Phi}^3 + \alpha_3 \dot{\Phi}^5 + \cdots \quad (9)$$

式中 $\alpha_i (i=1, 2, 3, \cdots)$ 是实值常数.

针对 (8) 式, 作如下设定 $x_1 = \Phi$, $x_2 = \dot{\Phi}$, 进一步转换成 (10) 式.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_2) + g \cdot \delta \\ y = x_1 \end{cases} \quad (10)$$

式中 x_1 和 x_2 为系统变量, y 为系统实际输出, $f(x_2)$ 为关于 x_2 的未知的系统函数 $f(x_2) = -\frac{1}{T}H(x_2)$

g 为已知的控制输入增益 $g = \frac{K}{T}$.

3.2 船舶轨迹线性自抗扰控制

根据船舶数学模型表达式 (10), 设计一种船舶运动轨迹线性自抗扰跟踪控制算法. 线性自抗扰控制器由线性跟踪微分器 (LTD)、线性组合 (LSEF) 和线性扩张状态观测器 (LESO) 3 个部分组成.

1) LTD

LTD 取代了传统 PID 控制的微分环节, 既解决了 PID 跟踪快速性与超调之间的矛盾问题, 又避免了控制输入信号快速波动问题. LTD 算法的离散化形式为:

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + h \cdot v_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + h \cdot \{-k_1[v_1(k) - \gamma_d(k)] - k_2 v_2(k)\} \end{cases} \quad (11)$$

式中 $\gamma_d(k)$ 为目标输入信号, h 为系统仿真步长, k 为采样次数, $v_1(k)$ 和 $v_2(k)$ 分别为 $\gamma_d(k)$ 和 $\dot{\gamma}_d(k)$ 的跟踪值, 和为系统设计参数.

2) LESO

LESO 的功能是将模型不确定性及外界干扰视为一个整体扰动, 并对其进行观测. 二阶线性自抗扰控制器利用三阶 LESO 进行干扰量的观测, 三阶 LESO 的离散表达式为:

$$\begin{cases} e(k) = z_1(k) - \gamma(k) \\ \beta_{01} = 3\omega_0, \beta_{02} = 3\omega_0^2, \beta_{03} = \omega_0^3 \\ \begin{cases} z_1(k+1) = z_1(k) + h \cdot [z_2(k) - \beta_{01} \cdot e(k)] \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h \cdot [z_3(k) - \beta_{02} \cdot e(k) + b_0 u(k)] \\ z_3(k+1) = z_3(k) + h \cdot [-\beta_{03} \cdot e(k)] \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

式中 $\gamma(k)$ 为被控对象输出, $z_1(k)$, $z_2(k)$ 和 $z_3(k)$ 为线性自抗扰控制器的 3 个输出, ω_0 表示 LESO 的带宽, b_0 为系统设计参数.

3) 线性状态误差反馈控制律

LSEF 实质上是一个线性 PD 控制律, 其算法的离散形式为:

$$\begin{cases} e_1(k+1) = v_1(k+1) - z_1(k+1) \\ e_2(k+1) = v_2(k+1) - z_2(k+1) \\ \beta_1 = \frac{2\omega_c}{b_0}, \beta_2 = \frac{2\omega_c^2}{b_0} \\ u_0(k+1) = \beta_1 \cdot e_1(k+1) + \beta_2 \cdot e_2(k+1) \end{cases} \quad (13)$$

式中 ω_c 为期望的闭环系统带宽, 与 LESO 带宽之间关系是: $5\omega_c \leq \omega_0 \leq 10\omega_c$. β_1 和 β_2 为设计参数. 控制律 u_0 是误差 e_1 和误差的微分 e_2 的线性组合形式. 为了消除总的未知干扰, 需要在输入被控对象执行机构前抵消这些未知扰动, 实际作用在被控对象执行机构的控制量 u 可以表示为如下离散化形式:

$$u(k+1) = u_0(k+1) - z_3(k+1)/b_0 \quad (14)$$

4 实例仿真

以文献 [13] 中实习船开展限制水域船舶避障仿真. 拟定航道有效宽度为 200 m, 船舶顺航道行驶, 初始位置偏航道中心右侧 30 m, 其正前方约 700 m 处存在一障碍物. 通过对长江航道船舶实际情况调查与分析, 确定船舶与障碍物及航道边界的安全距离的因素较多, 难以衡量. 考虑到整个航道的宽度只有 200 m, 避障的安全距离不宜过大, 因此, 暂时取 50 m.

为此, 利用线性自抗扰控制理论设计的船舶航行轨迹跟踪控制算法进行船舶避障运动控制. 避障过程中船舶运动轨迹如图 2 所示, 船舶控制舵角变化如图 3 所示, 船舶航向改变如图 4 所示. 由图 2 可以清晰的看出船舶运动轨迹完美的跟踪了 Sigmoid 函数曲线, 并且在整个过程中与障碍物保持了较安全的距离, 充分体现了 Sigmoid 函数曲线能够用于船舶狭水道航行避障路径规划. 图 3 是船舶避障过程中船舶控制舵角的实时曲线, 曲线走势符合船舶

实际避障操纵过程中舵角的改变操作. 图4是船舶航向改变实时变化曲线,也能够客观的反映船舶驾驶员实际避障过程中船舶航向的改变态势,符合实际情况.所以,Sigmoid函数曲线能够用于狭水道船舶避障时的运动轨迹规划.

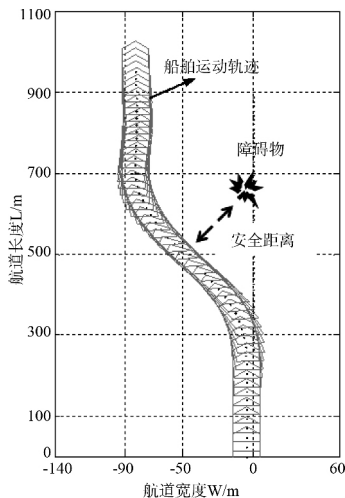


图2 船舶避障运动轨迹

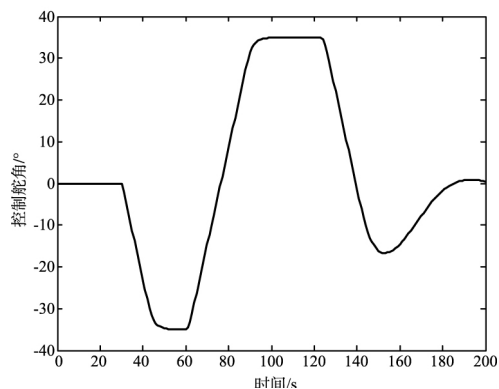


图3 控制舵角输入

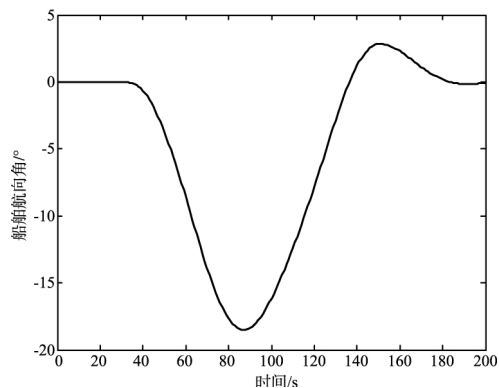


图4 船舶航向角输出

5 结论

在分析了船舶避障运动的一般流程后发现船舶避障轨迹近似接近于Sigmoid函数曲线.为此,通

过借鉴船舶运动路径规划理念,利用Sigmoid函数曲线构建船舶避障运动轨迹,并利用线性自抗扰控制算法对该轨迹进行实时跟踪控制,以保证安全避开障碍物.最后的仿真也证实了基于Sigmoid函数曲线构建的船舶避障路径能有效地实现船舶避让障碍物.鉴于本文模型建立在较为理想情况,忽略了他船构成的碰撞危险情况及航道水域风流对船舶轨迹跟踪的影响,为此,后续研究还应进一步拓展.

参考文献:

- [1] 关腾飞. 基于虚拟力场法的船舶避障功能的实现[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(7): 99-102.
- [2] YUANCHEN Z, LU J, RUI Z, et al. UAV formation control with obstacle avoidance using improved artificial potential fields[J]. Proceedings of the 36th Chinese Control Conference, 2017, (7): 6219-6224.
- [3] 曹建福, 凌志浩, 高冲, 等. 基于群集思想的多智能体编队避障算法研究[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(3): 562-566.
- [4] 茅云生, 宋利飞, 向祖权, 等. 水面无人艇多船障碍智能避碰[J]. 大连海事大学学报, 2015, 41(4): 8-13.
- [5] 蒲华燕, 丁峰, 李小毛, 等. 基于椭圆碰撞锥的无人艇动态避障方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1756-1762.
- [6] 王敏捷, 张汝波. 水面无人艇模糊近域图避障方法研究[J]. 计算机工程, 2012, 38(21): 164-167.
- [7] 沈海青, 郭晨, 李铁山, 等. 考虑航行经验规则的无人船舶智能避碰导航方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(6): 998-1005.
- [8] THANAPONG P, TOSHIHIRO M, TAMAKI U, et al. Application of A* algorithm for real-time path re-planning of an unmanned surface vehicle avoiding underwater obstacles[J]. Journal of Marine Science and Application, 2014, 13: 105-116.
- [9] SHUAI W, GUO-BIAO S, JIE W, et al. Research on active obstacle avoidance for autonomous vehicle based on model predictive control[J]. 2nd International Conference on Applied Mechanics and Mechatronics Engineering, 2017, 179-184.
- [10] RUBO Z, PINGPENG T, YUMIN S, et al. An adaptive obstacle avoidance algorithm for unmanned surface vehicle in complicated[J]. IEEECAA JOURNAL OF AUTOMATICA SINICA, 2014, 4(1): 385-396.
- [11] 王健, 赵又群, 杨君, 等. 避让工况下的路径跟踪线性自抗扰控制[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(10): 1361-1365.
- [12] YUANHUI W, JIAYING S, XIANGBO L. Dynamic obstacles trajectory prediction and collision avoidance of USV[J]. Proceedings of the 36th Chinese Control Conference, 2017, 7: 2910-2914.
- [13] 王仁强, 赵月林, 谢宝峰. 船舶动态转向避碰行动数学模型[J]. 大连海事大学学报, 2014, 40(1): 17-20.
- [14] 李荣辉, 李铁山, 卜仁祥. 欠驱动水面船舶航迹跟踪自抗扰控制[J]. 大连海事大学学报, 2013, 39(2): 5-8.

(下转第33页)

Research on Risk Decision-making of Emergency Response of Water Traffic Emergency Based on Scenario

CHEN Dan-yong¹, LIU Ming-ming²

(1. Navigation College, Guangzhou Maritime University, Guangzhou Guangdong 510725, China;

2. Maritime College, Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou Guangdong 510800, China)

Abstract: The water traffic accidents from the perspective of the situation was discussed, and new ideas for the level of water traffic emergency response processing was provided. The case study method is used to construct the emergency response risk decision analysis model of the water traffic emergency based on the “scenario-response” based on the elemental composition of the situation and the context of the situation. Through the case study of 11•27 foreign freighter collision accidents, it is found that the composition of the scenario mainly includes three dimensions, namely environment, emergency and emergency management, each of which contains different attributes and characteristics; Establish an emergency response mechanism for emergencies, and build an emergency process to provide reproducibility for the handling of homogenous water traffic accidents.

Key words: water transportation; emergency; emergency response; decision

(上接第28页)

Sigmoid Function Based Path Modelling of Obstacle Avoidance for Ship in Restricted Water

WANG Ren-qiang, ZHAO Yue

(College of Navigation, Jiangsu Maritime Institute, Nanjing Jiangsu 211170, China)

Abstract: A type of path planning method for obstacle avoidance based on Sigmoid function was designed for the problem of obstacle avoidance of ships in restricted waters. Firstly, the ship obstacle avoidance motion process and the geometric characteristics of Sigmoid function are analyzed. By referring to the concept of path planning, the ship's trajectory of avoiding danger based on Sigmoid function is constructed. Then, a ship motion active disturbance rejection control system is designed to realize real-time tracking of ship obstacle avoidance trajectory. The simulation results show that the ship avoidance path in restricted waters based on Sigmoid function is effective in practice and can guarantee the ship avoiding obstacles.

Key words: ship; obstacle avoidance; path planning; sigmoid function; restricted water; modeling